

A Föld-Hold rendszer L_5 Lagrange-pontja körüli Kordylewski-porhold kaotikus dinamikája és képző polarimetriája

Slíz Judit

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

Témavezető: Dr. Süli Áron (ELTE Csillagászati Tanszék)

Konzulens: Prof. Horváth Gábor (ELTE Biológiai Fizika Tanszék)

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Fizikai Intézet

Fizika Doktori Iskola

Részecskefizika és Csillagászat Doktori Program

Doktori Iskola vezetője:

Prof. Tél Tamás (2016-2019, ELTE Elméleti Fizika Tanszék)

Prof. Gubicza Jenő (2019-, ELTE Anyagfizikai Tanszék)

Programvezető: Prof. Katz Sándor (ELTE Elméleti Fizika Tanszék)



Budapest

2019

1. Bevezetés

A közös tömegközéppontjuk körül keringő két nagy tömegű égitest gravitációs terében 1767-ben Euler fölfedezett a két égitesten átmenő egyenesbe eső (kollineáris) három instabil pontot (L_1 , L_2 , L_3), majd 1772-ben Lagrange megtalálta a trianguláris L_4 és L_5 egyensúlyi pontokat. Az égi mechanika háromtest-problémájában az L_4 és az L_5 pontok lineárisan stabilak, ha a két égitest $Q = m_{\text{kisebb}}/(m_{\text{kisebb}} + m_{\text{nagyobb}})$ tömegaránya kisebb, mint $Q^* = 0.0385$. A csillagászok a Nap és bolygóinak L_4 és L_5 pontjai körül sok kis égitestet találtak. A legismertebb ezek közül a Nap-Jupiter rendszer L_4 és L_5 pontjai körüli görög és trójai aszteroida-csoportok, de találtak néhány kisbolygót a Nap-Föld, Nap-Mars és Nap-Neptunusz rendszer trianguláris Lagrange-pontjai körül is.

Mi a helyzet a Föld-Hold rendszer L_4 és L_5 Lagrange-pontjai környezetében? Mivel $Q = m_{\text{Hold}}/(m_{\text{Hold}} + m_{\text{Föld}}) = 0.012195 < Q^* = 0.0385$, ezért az L_4 és L_5 pontok stabilak, így a megfelelő sebességvektorral érkező bolygóközi porrészecskéket csapdába ejthetik. Ennek ellenére mégis lehetséges, hogy nem gyűlik össze anyag e pontok környezetében a Nap gravitációjából fakadó perturbáció miatt.

Doktori értekezésem 1. fejezetében két dimenzióban számítógéppel modelleztem a Föld-Hold rendszer L_5 pontja környezetében számos porrészecske mozgását a Nap perturbációs hatását is figyelembe véve, amely tranziensen kaotikusnak bizonyult.

A kimutatott átmeneti (tranzien) káosz föllépése azt sugallta, hogy a kaotikus dinamikai rendszerek elméletéből ismert módszerekkel is lehetséges űrutazásokat tervezni. Két ismert káoszkontroll módszert módosítva és ötvözve megakadályoztam a részecskék elszökését egy kijelölt tartományból. Ionmeghajtással megvalósítható olyan káoszkontroll módszert kerestem, amivel a Föld és Hold közti űrutazás a hagyományosnál gazdaságosabb, kevesebb hajtóanyagot igényel.

1961-ben Kazimierz Kordylewski lengyel csillagász két halvány foltot talált a Föld-Hold rendszer L_5 pontja közelében, amelyeket a föltételezése szerint az ott összegyűlt bolygóközi por fényszórása okozott. Azóta ezen alakzatot Kordylewski-porholdnak (KPH) hívják. Sok csillagász úgy véli, hogy e porfelhő nem létezhet, mert a Nap és a többi bolygó gravitációs erejéből és kisebb mértékben a sugárnyomásból és a napszélből származó perturbáció elrontja a Föld-Hold rendszer L_4 és L_5 Lagrange-pontjainak stabilitását. Korábban csak kevés számítógépes szimuláció vizsgálta a KPH kialakulását. E hiányt pótlandó, dolgozatom 2. fejezetében számítógépes modellezéssel tanulmányoztam a háromdimenziós korlátozott négytest-problémát (K4TP), ami esetünkben három nagy tömegű

égitestből, a Napból, a Földből és a Holdból, valamint egy kistömegű részecskéből áll. A szimuláció kezdeti időpontját úgy választottam meg, hogy az igazodjon a 3. fejezetben ismerttetendő polarizációs mérés időpontjához.

Dolgozatom 3. fejezetében az egyik távcsővemre szerelt képalkotó polariméterrel új bizonyítékot szolgáltatam a Föld-Hold rendszer L_5 pontja körüli KPH létezésére. A KPH ezen polarimetriás észlelése okán újraértékelendő Kordylewski úttörő fotometriai megfigyelése.

2. Anyagok, modellek és módszerek

Dolgozatomban először a korlátozott háromtest-probléma (K3TP) és négytest-probléma (K4TP) kétdimenziós modelljét vizsgáltam számítógépes szimulációkkal, amelyek két (Föld, Hold), illetve három (Nap, Föld, Hold) nagy tömegű testből és egy kis tömegű részecskéből állnak. Azért, hogy a valósághoz minél közelebb álló megoldást kapjak, a nagy tömegű testeket Naprendszerünk égitestjei közül választottam. A Nap, Föld és Hold kezdőkoordinátáit a szabadon elérhető NASA JPL adatbázisból vettem (Julián Dátum = 2455999.5 = 2012. március 13., 00:00 UT epochára).

A számításhoz adaptív lépésközü Runge-Kutta-Fehlberg 7(8) integrátort alkalmaztam, amiben az aktuális lépésközt az előre beállított $\epsilon = 10^{-16}$ megengedett relatív hiba határozta meg. A tesztészecske tömegét 1 kg-nak vettem. Hogy vizsgáljam a részecske kaotikus viselkedését és szökésének dinamikáját, $9 \cdot 10^4$ és 10^6 közötti számú részecskét helyeztem el az L_5 pont környezetében. Valamennyi részecskét az L_5 pont sebességével indítottam. Azt találtam, hogy az elszökő részecskék dinamikája a tranziens káosz formalizmusával írható le.

Módosítva és ötvözve Ott, Grebogi és Yorke (1990), valamint Lai (1996) káoszkontroll módszereit, a konfigurációs tér egy előre meghatározott tartományában tartottam egy részecskét egy megfelelően kidolgozott káoszkontrollal. A létező káoszkontroll módszerek (úgy a visszacsatolásosak mint a késleltetettek) azon az elven alapulnak, hogy van egy olyan rendszerparaméter, amit változtatni lehet. Azonban az általam vizsgált rendszerben nincs ilyen paraméter. A rendszer állapotát csak úgy tudom megváltoztatni, hogy például a részecske (űrhajó) sebességét változtatom a mozgása során.

Mivel a vizsgált K4TP-ben a nagy égitestek tömegei adottak, ezért a próbarészecske sebességét változtattam, hogy kontrolláljam a fázistérbeli helyét, amit egy pályamenti

érintőleges, folyamatos erőhatással tettem. A nem elszökő részecskék kezdő helykoordinátáit tartalmazó *kezdeti feltétel térképek* mutatják meg, hogy miként alkalmazható e kontrollerő.

Dolgozatom 2. felében háromdimenziós tömegközépponti négytest-modellt vizsgáltam, ami a Napból, Földből, Holdból és egy, a Föld-Hold rendszer L_5 pontja közeléből indított részecskéből állt. A Nap, Föld és Hold kezdeti hely- és sebességkoordinátáit szintén a szabad hozzáférésű NASA JPL adatbázisból vettem, derékszögű ekliptikai koordinátarendszerben, a Naprendszer tömegközéppontjára vonatkozóan. E koordinátákat és az L_5 pont kezdőkoordinátáit átszámítottam a Nap-Föld-Hold tömegközépponti derékszögű ekliptikai koordinátarendszerébe. Az összes számítást e háromdimenziós Nap-Föld-Hold tömegközépponti koordinátarendszerben végeztem, míg az eredményeket a könnyebb érthetőség kedvéért geocentrikus ekliptikai koordinátarendszerben ábrázoltam.

Egy részecskét nem elszökőnek tekintettem, ha 3650 napig nem hagyta el a $0.5r_0 \leq D \leq 1.5r_0$, $r_0 = \sqrt{(x_0 - x_{E0})^2 + (y_0 - y_{E0})^2 + (z_0 - z_{E0})^2}$ gömbhéjat, ahol $x_0, y_0, z_0, x_{E0}, y_{E0}, z_{E0}$ a részecske és a Föld kezdőkoordinátái a t_0 időpontban indítva, D a gömbhéj vastagsága. Amikor az L_5 Lagrange-pont körüli KPH-t modelleztem, nem volt elég a részecskéket egyetlen t_0 kezdőpillanatban indítani. Elvileg folyamatos befogást kellene modellezni ismeretlen részecskesűrűségű és sebességű közegben. Ehelyett a következőképpen jártam el: egy adott t_0 -ra megoldottam a mozgásegyenletet 1 860 000 részecskére, amelyek kezdeti hely- és sebességkoordinátáit az L_5 pont körüli tartományt egyenletesen felosztva választottam meg, az x, y és z tartományt 41, a v_x, v_y és v_z tartományt pedig 3 egyenlő részre osztva. Az egy adott t_0 -hoz tartozó nem elszökő részecskék képezték az "*egyedi porfelhőt*". A szimulációt megismétltem 28-szor, 28 különböző t_0 kezdőpillanatra. Végezetül az így kapott egyedi porfelhőket összegezve kaptam az "*egyesített porfelhőt*".

Megvizsgáltam a sugárnyomásból és a Poynting-Robertson-effektusból származó erők arányát a nagy égitestek (Nap, Föld, Hold) gravitációs erejéhez képest, és megállapítottam, hogy az $1 \mu\text{m}$ -nél nagyobb részecskékre az előbbiek hatása elhanyagolható. Másrészt, a $0.01 \mu\text{m}$ sugarúnál kisebb részecskékre a sugárnyomás elhanyagolható, mert a napsugárzás karakterisztikus hullámhossza túl nagy ahhoz, hogy elnyelődjön vagy szóródjon. A sugárnyomás a 0.1 és $0.5 \mu\text{m}$ közötti sugártartományba eső részecskék esetén maximális (és bizonyos anyagok esetében felül is múlhatja a gravitációs erőt) hosszabb idő elteltével. Ezért a rövid ideig tartó szimulációimban eltekinthettem a sugárnyomástól és a Poynting-Robertson-effektustól, és csak a három égitest gravitációját vettem figyelembe.

Dolgozatom 3. fejezetében a Föld-Hold rendszer L_5 Lagrange-pontja környékén megfigyelt Kordylewski-porhold (KPH) földi képalakító polarimetriával mért polarizációs mintázatait mutatom be. Mivel a KPH rendkívül halvány jelenség, a közönséges fotometria helyett szekvenciális képalakító polarimetriát alkalmaztam Prof. Horváth Gábor útmutatásai mellett. E polarimétert Dr. Barta András (Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest) építette, és Márai Attila gépészmérnök, amatőr csillagász szerelte föl az egyik távcsővemre. Polarizációs méréseimet a Badacsonytördemicen (keleti hosszúság $17^\circ 28' 15''$, északi szélesség $46^\circ 48' 27''$) található saját csillagvizsgálómban végeztem. Tokina AF 300/2.8 teleobjektívra szerelt Moravian G3-11000 ABG teljes képmezős, 7.5° (vízszintes) $\times 5^\circ$ (függőleges) látószögű, szűrőtárcsába helyezett három, egymáshoz képest 120° -kal elforgatott áteresztési irányú, 2"-os lineáris polárszűrővel (Edmund Optics, 43-785, USA) felszerelt CCD kamerát használtam. A polarimetriára így alkalmassá tett teleobjektívemre szerelt polárszűrőkkel a kiválasztott égterületen egyenként 180 másodperces expozíciós idejű felvételeket készítettem egymás után. E három polarizációs felvételt Dr. Barta András AlgoNet (<http://www.estrato.hu/algonet>) szoftverével értékeltem ki. E program minden egyes képpontban kiszámította a p lineáris polarizációfokot és α polarizációs szöget a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) hullámhosszain. Az eredményül kapott p - és α -értékeket kétdimenziós hamis színes mintázatok formájában jelenítettem meg külön-külön a három színsatornában. Hogy csökkentsem a zajt, a kamerát -10°C -ra hűtöttem, kiszűrve a kiolvasási zajt és a sötét zajt. A peremsötétedés okozta fényességingadozást egyenletes képmezőjű referenciaképek készítésével küszöböltem ki. A képfeldolgozást a MaxIm DL6 szoftverrel végeztem. A motormeghajtású ekvatoriális szerelésű német Fornax 100 távcsőmechanikára a pontosabb irányítást elősegítő Telescope Drive Master-t szereltem föl.

3. Eredmények

3.1. Tranziens káosz és káoszkontroll a Föld-Hold rendszer L_5

Lagrange-pontja környezetében

(3.1.1.) A korlátozott három- és négytest-probléma (Nap-Föld-Hold-részecske) kétdimenziós modelljének számítógépes szimulációjával megmutattam, hogy a Föld-Hold rendszer L_5 Lagrange-pontja környezetéből indított részecskék mozgása kaotikus, és e káosz átmeneti (tranziens). Meghatároztam e tranziens káosz következő jellemzőit:

a részecskék szökési rátája és átlagos élettartama, valamint az exponenciális és hatványfüggvény szerinti szökés kitevői.

- (3.1.2.) Numerikusan megkonstruáltam a kaotikus nyereg stabil sokaságát a fázistér egy adott állapotára, amit kezdeti feltétel térképnek neveztem. Megmutattam, hogy a kezdeti feltétel térképeken van egy, a hosszú ideig bennmaradó részecskéket tartalmazó ("stabil") sziget az L_5 pont körül mind a korlátozott háromtest-, mind a négytest-probléma modelljében. Különböző naptömegek esetén meghatároztam a Nap gravitációs erejének perturbációs hatását e sziget nagyságára és helyére. Azt kaptam, hogy minél nagyobb a Nap tömege, annál kisebb e stabil sziget és a Földtől annál kijebb tolódik.
- (3.1.3.) Megmutattam, hogy minél hosszabb az integrációs idő, annál kisebb a stabil sziget mérete, és a hosszabb ideig stabil szigetek a rövidebb ideig stabil szigetek részét képezik.
- (3.1.3.) Megmutattam, hogy a stabil sziget körül a kezdeti feltétel térkép szerkezete fraktálszerkezetű, ami egyes részecskék rövid ideig történő bennmaradásáért felelős.
- (3.1.4.) Megmutattam, hogy a részecskék kezdősebességének kis megváltoztatása a kezdeti feltétel térkép struktúrájának a Földtől távolodó/közeledő eltolódását okozza az x - y síkon, ami a káoszkontroll módszerem alapja lett.
- (3.1.5.) Új káoszkontroll módszert dolgoztam ki egy részecskének a Föld-Hold rendszer L_5 pontja körüli pályán tartására, valamint egy űrhajónak alacsony Föld körüli pályáról alacsony Hold körüli pályára juttatására az L_5 ponton keresztül. E manőverek például ionhajtóművel valósíthatók meg. Számításaim szerint, egy 1850 kg tömegű űrhajót 20.9 MJ energiával akár 100 évig is korlátos pályán lehet tartani az L_5 pont körül. Ezzel szemben a Föld-Hold űrutazás energiaszükséglete hasonló más alternatív módszerekéhez, mint például a gyenge stabilitási határ (*weak stability boundary*, *WSB*) módszere. Új módszeremmel a röptelési idő csak egy hónap a *WSB* módszer 3-5 hónapja helyett.

3.2. A Föld-Hold rendszer L_5 pontja körüli Kordylewski-féle porhold számítógépes szimulációja

- (3.2.1.) A korlátozott négytest-probléma (Nap-Föld-Hold-részecske) háromdimenziós modelljének számítógépes szimulációjában 1 860 000 részecskét egyenként indítva föltérképeztem az L_5 pont környezetéből 3650 napig nem elszökő részecskék kezdőpontjainak szigetét, ami a Kordylewski-porhold (KPH) része.
- (3.2.2.) Megmutattam, hogy a sugárnyomás és a Poynting-Robertson-effektus elhanyagolható a gravitációs erő mellett az $1\text{ }\mu\text{m}$ -nél nagyobb sugarú részecskékre. A $0.1\text{--}0.5\text{ }\mu\text{m}$ sugarú részecskék is csak elegendő hosszú idő után sodródnak ki az L_5 pont környezetéből. Ezért e két erő hatása a viszonylag rövid ideig tartó szimulációimban elhanyagolható volt.
- (3.2.3.) Számítógépes modellezéssel meghatároztam az 1-28 nappal korábban befogott részecskékből álló KPH látóirányú sűrűségeloszlását a Földről nézve.

3.3. A Kordylewski-porhold képalkotó polarimetriai észlelése

- (3.3.1.) Két egymás utáni éjszakán (2017. augusztus 17-én 23:29:57 UT-kor és augusztus 19-én 01:14:15 UT-kor) szekvenciális képalkotó polarimetriával észleltem az L_5 pont körüli KPH polarizációs jeleit. A mérésekre a Badacsonytördemicen (keleti hosszúság $17^\circ 28' 15''$, északi szélesség $46^\circ 48' 27''$) lévő magánobszervatóriumomban került sor. Kontrollmérésekkel kizártam a lehetséges műtermékek következő fajtáit: állatövi fény, környezeti fényszennyezés, cirrusfelhő, repülőgép kondenzcsíkja.
- (3.3.2.) 2017. augusztus 17-én 23:29:57 UT-kor és 2017. augusztus 19-én 01:14:15-kor a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában képalkotó polarimetriával mértem az L_5 pont körüli KPH p lineáris polarizációfokának és α polarizációszögének 7.5° (vízszintes) $\times 5^\circ$ (függőleges) kiterjedésű mintázatait. A Kordylewski-porhold jól látszik mind a p -, mind az α -mintázatokon, és ugyanolyan sávós szerkezete van, mint a számítógéppel modellezett porholdnak.

- (3.3.3.) Megmutattam, hogy az L_5 pont körül mért p lineáris polarizációfok 2017. augusztus 17-én 23:29:57 UT-kor 73° fázisszög mellett valamivel kisebb, mint 2017. augusztus 19-én 01:14:15 UT-kor 87.3° fázisszög esetén: a leggyakoribb p^* -érték 6 % az előbbi és 7 % az utóbbi esetben, továbbá a p^* gyakorisága az előző esetben kicsivel kisebb (15.8 %), mint az utóbbiban (16.9 %). Mindez megfelel annak a fényszóráselméleti jóslatnak, hogy p annál nagyobb, minél közelebb van a fázisszög 90° -hoz.
- (3.3.4.) Összehasonlítottam a szimulációval kapott részecskesűrűség-mintázatot a mért p - és α -mintázatokkal. Azt a figyelemre méltó hasonlóságot tapasztaltam, hogy mindhárom mintázat többrészes csomósodással bír, több elnyúlt sávval. Ezek szerint a KPH egy nem egyenletes sűrűségű részecskehalmoz.
- (3.3.5.) Az L_5 pontot tartalmazó központi égblokon túl még négy szomszédos ablakban mértem a KPH polarizációs mintázatait.

4. Közlemények

4.1. A doktori értekezés alapját képező közlemények

- [1] Slíz J., Süli Á., Kovács T. (2015) Control of chaos in the vicinity of the Earth-Moon L_5 Lagrangian point to keep a spacecraft in orbit. *Astronomische Nachrichten* 336 (1): 23-31
- [2] Slíz J., Kovács T., Süli Á. (2017) Chaos control with ion propulsion. *Astronomische Nachrichten* 338 (5): 536-549
- [3] Slíz-Balogh J., Barta A., Horváth G. (2018) Celestial mechanics and polarization optics of the Kordylewski dust cloud in the Earth-Moon Lagrange point L_5 - I. Three-dimensional celestial mechanical modelling of dust cloud formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 480 (4): 5550-5559
- [4] Slíz-Balogh J., Barta A., Horváth G. (2019) Celestial mechanics and polarization optics of the Kordylewski dust cloud in the Earth-Moon Lagrange point L_5 - II. Imaging

polarimetric observation: Evidence for the existence of Kordylewski dust cloud.
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 482 (1): 762-770

4.2. A doktori értekezéshez kapcsolódó további közlemények

- [H1] **Slíz-Balogh J.**, Barta A., Horváth G. (2019) Kordylewski porholdjának polarimetriai észlelése: Lagrange égi porszívója. *Természet Világa* 150: 169-175
- [H2] Horváth G., **Slíz-Balogh J.** (2019) Interjú Kazimierz Kordylewski lengyel csillagász fiaival: porholdmérés polarimetriával. *Élet és Tudomány* 74: 425-427